

1/5/1 (Item 1 from file: 351)  
DIALOG(R)File 351:Derwent WPI  
(c) 2005 Thomson Derwent. All rts. reserv.

10/539290

JC17 Rec'd PCT/PTO 16 JUN 2005

014978229 \*\*Image available\*\*  
WPI Acc No: 2003-038743/200303  
XRPX Acc No: N03-030155

**Thin film based wavelength dispersion compensation element for use in  
optical fiber transmission system, has fundamental reflection and  
transmission layers with unique optical properties**

Patent Assignee: KIKUCHI K (KIKU-I); OYO KODEN KENKYUSHITSU KK (OYOK-N);  
FURUKI K (FURU-I); JABLONSKI M K (JABL-I); TAKUSHIMA Y (TAKU-I); TANAKA Y  
(TANA-I)

Inventor: FURUKI K; JABLONSKI M K; KIKUCHI K; TAKUSHIMA Y; TANAKA Y

Number of Countries: 002 Number of Patents: 002

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
US 20020064334	A1	20020530	US 2001974824	A	20011012	200303 B
JP 2002122732	A	20020426	JP 2000314298	A	20001013	200303

Priority Applications (No Type Date): JP 2000314298 A 20001013

Patent Details:

Patent No	Kind	Lan	Pg	Main IPC	Filing Notes
US 20020064334	A1		24	G02B-006/26	
JP 2002122732	A		19	G02B-005/28	

Abstract (Basic): US 20020064334 A1

NOVELTY - The dispersion compensation element comprises fundamental reflection layers and transmission layers with unique optical properties. The reflection layers has reflectance values that satisfy a specific relation.

USE - For use in optical fiber transmission system for fiber optic light wave communication.

ADVANTAGE - Simplified structure of high reliability is produced at low cost.

pp; 24 DwgNo 1/12

Title Terms: THIN; FILM; BASED; WAVELENGTH; DISPERSE; COMPENSATE; ELEMENT;  
OPTICAL; TRANSMISSION; SYSTEM; FUNDAMENTAL; REFLECT; TRANSMISSION; LAYER;  
UNIQUE; OPTICAL; PROPERTIES

Derwent Class: P81; V07; W02

International Patent Class (Main): G02B-005/28; G02B-006/26

International Patent Class (Additional): G02B-001/10; G02B-006/28;

H04B-010/02; H04B-010/18

File Segment: EPI; EngPI

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-122732

(43)Date of publication of application : 26.04.2002

(51)Int.Cl.

G02B 5/28

H04B 10/02

H04B 10/18

(21)Application number : 2000-314298

(71)Applicant : OYOKODEN LAB CO LTD  
KIKUCHI KAZURO

(22)Date of filing : 13.10.2000

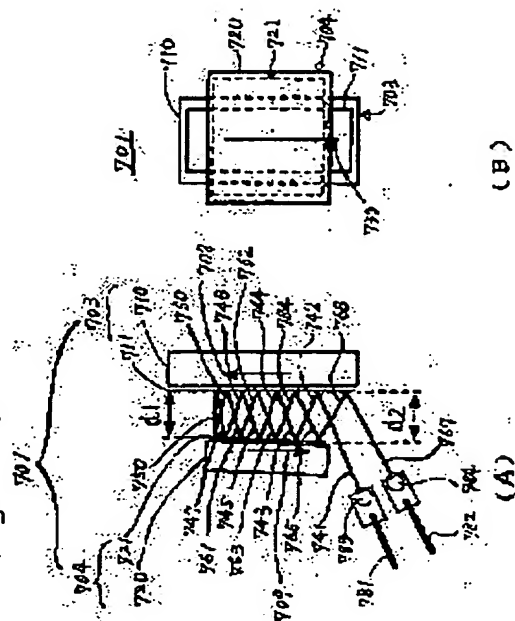
(72)Inventor : KIKUCHI KAZURO  
TAKUSHIMA YUICHI  
MARK KENNETH ZHABORONSKI  
TANAKA YUICHI  
KATAOKA HARUKI  
KOJO KENJI  
AZUMA SHIN  
SATO KAZUYA  
YAGUCHI HIROSHI  
YAMASHITA SHIRO

## (54) OPTICAL DISPERSION COMPENSATING DEVICE

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To solve such problems that conventionally signals transmitting through optical fibers cause wavelength dispersion for the optical communication at a  $\geq 10$  Gbps communication bit rate, particularly at  $\geq 40$  Gbps, and this brings severe hindrance for the communication, and even though various kinds of methods or devices for the dispersion compensation are proposed, the losses due to connection increases when the communication band are widened.

**SOLUTION:** An optical dispersion compensation device, having a wide-band width for dispersion compensation, is prepared and used for a composite type optical dispersion compensation device composed of a plurality of elements which can compensate the optical dispersion connected in series, so as to compensate the dispersion. Thus, the obtained composite optical dispersion compensation device realizes low loss over a wide-band.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than withdrawal  
the examiner's decision of rejection or

application converted registration]

[Date of final disposal for application] 30.06.2003

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-122732<sup>V</sup>

(P2002-122732A)

(43) 公開日 平成14年4月26日 (2002.4.26)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マ- (参考)
G 0 2 B	5/28	G 0 2 B 5/28	2 H 0 4 8
H 0 4 B	10/02	H 0 4 B 9/00	M 5 K 0 0 2
	10/18		

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2000-314298 (P2000-314298)

(22) 出願日 平成12年10月13日 (2000.10.13)

(71) 出願人 391023312

株式会社応用光電研究室  
東京都杉並区和田 1 丁目13番23号

(71) 出願人 597173831

菊池 和朗  
神奈川県横浜市港北区新吉田町1139-1  
フォルム綱島クレスタワーズ1304

(72) 発明者 菊池 和朗

神奈川県横浜市港北区新吉田町1139-1  
フォルム綱島クレスタワーズ1304

(74) 代理人 100085419

弁理士 大垣 孝

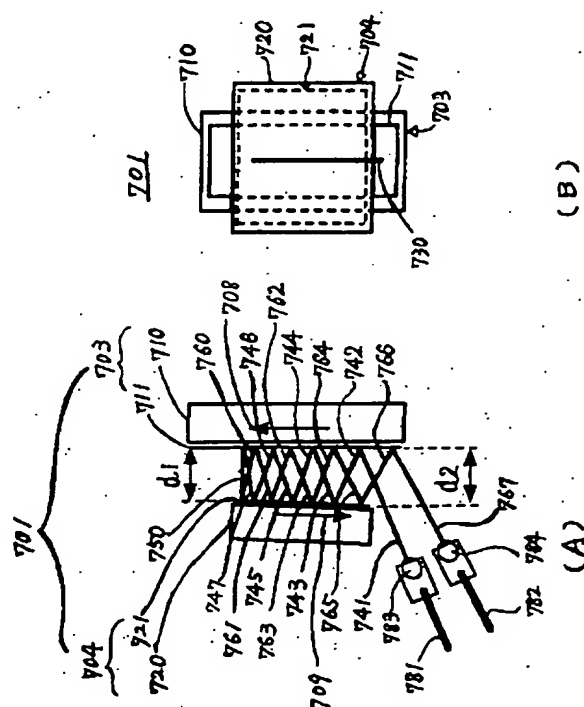
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光分散補償素子

(57) 【要約】

【課題】 従来、通信ビットレートが10Gbps以上、特に40Gbps以上の光通信においては、光ファイバを伝送する信号に波長分散が生じ、通信上大きな支障があり、これを解決しようと、種々の分散補償方法や素子が提案されてきたが、広帯域にすると接続による損失が大きくなるという課題があった。

【解決手段】 光分散補償素子として分散補償帯域幅の広いものをつくり、複数の光分散補償を行うことができる素子を直列に接続して構成した複合型の光分散補償素子に用いて、分散補償を行うことで低損失広帯域化が可能な複合型の光分散補償素子を実現した。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光ファイバを通信伝送路に用いる通信に使用して波長分散（以下、単に、分散ともいう）を補償することが出来る光分散補償素子であって、前記光分散補償素子が、入射光に対して分散補償を行うことが出来る多層膜を有しており、前記多層膜は、少なくとも 3 層の光学的性質の異なる層から構成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の光分散補償素子において、前記多層膜が 7 層であり、膜の厚み方向の一方の側から順に前記 7 層を第 1 層、第 2 層、第 3 層、第 4 層、第 5 層、第 6 層、第 7 層と称するとき、反射層が第 1 層、第 3 層、第 5 層、第 7 層であり、その反射率をそれぞれ  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_5$ 、 $R_7$  とすると、 $R_1 \leq R_3 \leq R_5 \leq R_7$  であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 3】 請求項 1 または 2 に記載の光分散補償素子において、入射光の中心波長を  $\lambda$  として、入射光の中心波長の光に対する光路長（以下、単に、光路長ともいう）として考えたときの膜厚（以下、単に、膜厚あるいは膜の厚みともいう）が  $\lambda$  の 4 分の 1 ( $\lambda/4$ ) の整数倍である積層膜を少なくとも 7 層有する多層膜を有し、入射光に対して、前記多層膜が少なくとも 4 つの光反射層（以下、単に、反射層ともいう）を有するように形成されている多層膜であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 4】 請求項 3 に記載の光分散補償素子において、前記 7 層の多層膜が、膜厚が  $\lambda$  の  $1/4$  倍で屈折率が比較的高い方の層（以下、層 H ともいう）と膜厚が  $\lambda$  の  $1/4$  倍で屈折率が比較的低い方の層（以下、層 L ともいう）を組み合わせた層の複数組で構成されており、前記 7 層の多層膜が、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層 L、層 H の順に組み合わせた層（以下、LH の層ともいう）を 1 セット積層して構成される層（以下、層（ア）とも称す）、層 L と層 L を組み合わせた層（すなわち、層 L を 2 層積層して構成される層、以下、LL の層ともいう）を 9 セット積層して構成される層（以下、層（イ）とも称す）、層 H を 1 層と LH の層を 2 セットとを積層して構成される層（以下、層（ウ）とも称す）、LL の層を 11 セット積層して構成される層（以下、層（エ）とも称す）、層 H を 1 層と LH の層を 4 セットとを積層して構成される層（以下、層（オ）とも称す）、LL の層を 9 セット積層して構成される層（以下、層（カ）とも称す）、層 H を 1 層と LH の層を 13 セットとを積層して構成される層（以下、層（キ）とも称す）の各層で形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 5】 請求項 3 に記載の光分散補償素子において、前記 7 層の多層膜が、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、前記層（ア）と同一構成の層、LL の層を 3 セットと層 H と層 H を組み合わせた層（すなわち、層 H

を 2 層積層して構成される層、以下、HH の層ともいう）を 3 セットと LL の層を 2 セットと HH の層を 1 セットと LL の層を 1 セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（ク）ともいう）、前記層（ウ）と同一構成の層、LL の層を 3 セットと HH の層を 3 セットと LL の層を 3 セットと HH の層を 1 セットと LL の層を 2 セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（ケ）ともいう）、前記層（オ）と同一構成の層、LL の層を 3 セットと HH の層を 3 セットと LL の層を 2 セットと HH の層を 1 セットと LL の層を 1 セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（コ）とも称す）、前記層（キ）と同一構成の層の各層で形成されていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 6】 請求項 2～5 のいずれか一項に記載の光分散補償素子において、波長が 1550 nm の入射光に対して、前記反射率  $R_1$  が 3～50%、前記反射率  $R_3$  が 50～80%、前記反射率  $R_5$  が 80～98.5%、前記反射率  $R_7$  が 98.6～100% であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 7】 請求項 4 または 5 に記載の光分散補償素子において、波長が 1550 nm の入射光に対して、前記反射率  $R_1$  が 4% 近傍、前記反射率  $R_3$  が 65% 近傍、前記反射率  $R_5$  が 96% 近傍、前記反射率  $R_7$  が 100% 近傍であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 8】 請求項 1～7 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記多層膜の厚み方向の両端に、前記多層膜とは異なる物質（以下、基板ともいう）が設けられていることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 9】 請求項 8 に記載の光分散補償素子において、前記基板のうちの少なくとも一方の前記基板が、入射光を透過することができることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 10】 請求項 1～9 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償素子が光分散補償素子を複数組み合わせた複合型の光分散補償素子を構成する各光分散補償素子の少なくとも 1 つであることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 11】 請求項 10 に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償素子が、前記複合型の光分散補償素子を構成する少なくとも一組の、光の入射面（以下、光の入射面を、単に、入射面ともいう）が対向して配置された少なくとも一対の光分散補償素子（以下、前記光分散補償素子一対のそれぞれを、光分散補償素子単体ともいう）を構成する光分散補償素子の少なくとも 1 つであることを特徴とする複合型の光分散補償素子。

【請求項 12】 請求項 1～11 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償素子の多層膜を構成する少なくとも 1 つの積層膜の膜厚が、前記多層膜の光の入射面に平行な断面における面内方向（以下、入射面内方向ともいう）において変化している（以

下、単に膜厚が変化しているともいう)ことを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 13】 請求項 12 に記載の光分散補償素子において、前記多層膜の膜厚が変化している層の少なくとも 1 つの層が、反射層と反射層とに挟まれた層であることを特徴とする光分散補償素子。

【請求項 14】 請求項 12 または 13 に記載の光分散補償素子において、前記光分散補償素子に係合して、前記多層膜の入射面における光の入射位置を変える手段が設けられていることを特徴とする複合型の光分散補償素子。

【請求項 15】 請求項 2 ～ 15 のいずれか 1 項に記載の光分散補償素子において、2 つの反射層に挟まれた層の少なくとも 1 つが光透過層であることを特徴とする光分散補償素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明の以下の説明において、光分散補償のことを単に分散補償とも称し、光分散補償素子のことを単に分散補償素子ともいい、光分散補償方法のことを単に分散補償方法ともいう。

【0002】 本発明は、伝送路に光ファイバ（以下、光ファイバのことを、単に、ファイバともいう）を用い、信号光として、たとえば、波長が  $1.55\mu\text{m}$  近傍の光などを用いた光通信において生ずる 2 次以上（後述）の波長分散（以下、単に、分散ともいう）を補償可能な素子（以下、2 次の分散を補償可能な素子のことを 2 次の分散を変えることができる素子、あるいは、2 次分散補償素子ともいう。また、後述の 3 次の分散を補償可能な素子についても、これと同様に、3 次の分散を変えることができる素子、あるいは、3 次分散補償素子ともいう。）を有する分散補償素子に関し、さらに、前記分散補償素子を複数あるいは複数組み合わせたりそれらの中に前記分散補償素子を少なくとも一対、光の入射面を対向させて配置した分散補償素子を含む、損失の少ない、複合型の光分散補償素子を構成する光分散補償素子および前記と同様の構成をした素子等を用いて行う光分散補償方法に関する。

【0003】 そして、本発明は、特に、低損失で 3 次以上の分散を補償することが出来る分散補償素子およびそれを用いた分散補償方法、あるいは、低損失で 2 次と 3 次以上の分散補償を行うことが出来る分散補償素子およびそれを用いた分散補償方法に関して大きな効果をもたらすものである。

【0004】 そして、本発明の分散補償素子は、前記の 3 次分散補償素子だけの場合もあり、また、後述の入射面内における入射光の入射位置等を変化させる手段を含む場合もあり、また、3 次以上の分散補償のみならず、2 次の分散補償が可能ないように構成されている場合もあり、ケースに実装されている場合もあり、ケースに実装

されていないいわゆるチップ状やウェハー状の場合もある。

【0005】 本発明の分散補償素子は、これらのすべての形態を含んでおり、使用状況や販売などの目的に応じて、種々の形態をとることができるものである。

【0006】 本発明では、2 次の分散補償とは「図 11 (A) を用いて後述する波長－時間特性曲線の分散の傾きを補償すること」を意味し、3 次の分散補償とは「図 11 (A) を用いて後述する波長－時間特性曲線の曲がりを補償すること」を意味する。

【0007】

【従来の技術】 通信伝送路に光ファイバを用いる光通信においては、利用技術の進展および利用範囲の拡大とともに、通信伝送路の長距離化や通信ビットレートの高速度化が求められている。このような環境下では、光ファイバを伝送するときに生じる分散が大きな問題となり、分散の補償が種々試みられている。現在、2 次の分散が大きな問題となり、その補償が種々提案され、そのうちのいくつかの提案が効果をあげている。

【0008】 しかし、光通信に対する要求が高度になるにつれて、送信中の 2 次の分散の補償だけでは不十分になり、3 次の分散の補償が課題になりつつある。

【0009】 以下、図 11 および図 12 を使用して、従来の 2 次の分散補償方法を説明する。

【0010】 図 12 は、シングルモード光ファイバ（以下、SMF とも称す）と分散補償ファイバ、および分散シフトファイバ（以下、DSF ともいう）の分散－波長特性を説明する図である。図 12 において、符号 601 は SMF の分散－波長特性を示すグラフ、602 は分散補償ファイバの分散－波長特性を示すグラフ、603 は DSF の分散－波長特性を示すグラフで、縦軸を分散、横軸を波長にとったグラフである。

【0011】 図 12 で明らかなように、SMF では、ファイバに入力する（以下、入射するともいう）光の波長が  $1.3\mu\text{m}$  から  $1.8\mu\text{m}$  へと長くなるにつれて分散は増大し、分散補償ファイバでは、入力光（以下、入射光ともいう）の波長が  $1.3\mu\text{m}$  から  $1.8\mu\text{m}$  まで長くなるにつれて分散は減少する。また、DSF では、入力光の波長が  $1.2\mu\text{m}$  から  $1.55\mu\text{m}$  付近へと長くなるにつれて分散は減少し、入力光の波長が  $1.55\mu\text{m}$  付近から  $1.8\mu\text{m}$  へと長くなるにつれて分散が増大する。そして、DSF では、従来の  $2.5\text{Gbps}$ （毎秒 2.5 ギガビット）程度の通信ビットレートの光通信においては、入力光の波長が  $1.55\mu\text{m}$  付近では、分散は光通信上支障を生じない。

【0012】 図 11 は、主として 2 次の分散の補償方法を説明する図であり、(A) は波長－時間特性と光強度－時間特性を、(B) は SMF を用いた伝送路において分散補償ファイバを用いて 2 次の分散補償を行った伝送例を、(C) は SMF だけで構成した伝送路での伝送例

を説明する図である。

【0013】図11において、符号501と511は伝送路に入力する前の信号光の特性を示すグラフを、530はSMF531で構成された伝送路を、502と512は、グラフ501と511で示した特性の信号光が伝送路530を伝送されて伝送路530から出力された信号光の特性を示すグラフ、520は分散補償ファイバ521とSMF522から構成された伝送路、503と513は、グラフ501と511で示した特性の信号光が伝送路520を伝送されて伝送路520から出力された信号光の特性を示すグラフである。符号504および514は、グラフ501と511で示した特性の信号光が伝送路520を伝送されて伝送路520から出力されて後、本発明によって後述の望ましい3次分散補償を施したときの信号光の特性を示すグラフであり、グラフ501および511とほとんど一致している。また、グラフ501、502、503、504はそれぞれ縦軸を波長、横軸を時間（または時刻）にとったグラフであり、グラフ511、512、513、514はそれぞれ縦軸を光強度、横軸を時間（または時刻）にとったグラフである。なお、符号524と534は送信器、525と535は受信器である。

【0014】従来のSMFは、前述のように、信号光の波長が1.3 $\mu$ mから1.8 $\mu$ mへと長くなるにつれて分散が増加するため、高速通信や長距離伝送の際には、分散による群速度遅延を生じる。SMFで構成された伝送路530では、信号光は伝送中に長波長側が短波長側に比べ大きく遅延して、グラフ502と512に示すようになる。このように変化した信号光は、たとえば高速通信・長距離伝送においては、前後の信号光と重なって正確な信号として受信できない場合がある。

【0015】このような問題を解決するため、従来は、たとえば、図11(B)に示すように分散補償ファイバを用いて分散を補償（あるいは、補正ともいう）している。

【0016】従来の分散補償ファイバは、波長が1.3 $\mu$ mから1.8 $\mu$ mへと長くなるにつれて分散が増加するというSMFの問題点を解決するため、前述のように、波長が1.3 $\mu$ mから1.8 $\mu$ mへと長くなるにつれて分散が減少するように作られている。

【0017】分散補償ファイバは、たとえば、図11の伝送路520で示すように、SMF522に分散補償ファイバ521を接続して用いることができる。上記伝送路520では、信号光は、SMF522では長波長側が短波長側に比べて大きく遅延し、分散補償ファイバ521では短波長側が長波長側に比べて大きく遅延することにより、グラフ503と513に示すように、グラフ502と512に示す変化よりも変化量を小さく抑えることができる。

【0018】しかし、分散補償ファイバを使用した上記

従来の2次の波長分散の補償方法では、伝送路を伝送した信号光の波長分散を、伝送路に入力する前の信号光の状態、すなわち、グラフ501の形までには分散補償することができず、グラフ503の形まで補償するのが限界である。グラフ503に示すように、分散補償ファイバを使用した従来の2次の波長分散の補償方法では、信号光の中心波長の光が短波長側の光および長波長側の光に比べて遅延せず、信号光の中心波長成分の光より短波長側および長波長側の成分の光のみが遅延する。そして、グラフ513に示すようにグラフの一部にリップルが生じることがある。

【0019】これらの現象は、光通信の伝送距離の長距離化と通信速度の高速化のニーズが高まるに従い、正確な信号受信ができなくなるなどの大きな問題となりつつある。たとえば、通信ビットレートが10Gbps（毎秒10ギガビット）以上の高速通信においては、これらの現象がかなり心配されており、特に、通信ビットレートが40Gbps以上の通信においては極めて重大な課題として心配されている。

【0020】そして、このような高速通信においては、従来の光ファイバ通信システムを使用することは困難と考えられており、たとえば、光ファイバ自体の材質も変える必要が叫ばれるなど、システム構築の経済的な観点からも重大問題となっている。

【0021】

【発明が解決しようとする課題】このような分散の補償を行うには、2次の分散補償だけでは困難であり、3次以上の分散補償が必要になる。

【0022】従来、波長が1.55 $\mu$ m付近の光に対して2次の分散が少なくなるような光ファイバとしてDSFがあるが、このファイバだけでは前述の、図11、図12の特性からも明らかなように、本発明の課題とする3次の分散補償はできない。

【0023】光通信の高速通信化、長距離通信化を実現するにあたり、3次の分散は大きな問題として次第に認識され、その補償が重要な課題となりつつある。3次の分散の補償問題を解決すべく、多くの試みが行なわれているが、従来の課題を十分に解決することができる3次分散補償素子や補償方法はまだ実用化されていない。

【0024】前記の3次分散の補償に用いる光分散補償素子の一例として本発明者らが提案した誘電体などの多層膜は、3次の分散補償に成功し、従来の光通信技術を大きく前進させることが出来た。

【0025】しかし、たとえば通信ビットレートを40Gbps、80Gbpsなどのように高速化した場合の3次の分散補償を理想的に行ったり、複数チャンネルの光通信における3次の分散の補償を十分に行うには、さらに広い波長域において、2次と3次以上の分散を十分に補償できる分散補償素子が望まれる。

【0026】その1つの提案として、本発明の発明者ら

によって群速度遅延の波長帯域および群速度遅延の遅延時間を調整可能な3次分散補償素子の提案が行われている。特に、各チャンネルの波長にも適する3次以上の分散補償素子を安価に実用化する1つの方法として、本発明の発明者らは、波長可変な（すなわち、分散補償対象波長を選択可能な）分散補償素子を提案した。

【0027】しかしながら、これらの分散補償素子で広い波長域で十分な分散補償を行い得るような群速度遅延時間一波長特性を有する分散補償素子を得ることはかなり難しい。

【0028】広い波長域で良好な分散補償を行ない得るような群速度遅延時間一波長特性を有する分散補償素子を得る方法として、本発明者らが提案した分散補償を行うことが出来る素子を信号光の光路において複数個直列に接続して複合型の光分散補償素子を構成する方法がある。この場合、分散補償を行うことが出来る素子を、たとえば、光ファイバとレンズを有する光ファイバコリメータを介して直列に接続すると、分散補償全体としての形状寸法が大型になり、さらに、その損失が積算されることになる。そのため、複合型の分散補償素子の損失を

いかに小さくすることが出来るかが大きな問題である。【0029】さらに、信号光の分散状況に応じて分散補償を変える必要がある場合、光分散補償素子を変えなければならない。しかし、15nm、30nmという広い波長帯域に関しての光分散補償素子の内容を変えることは非常に難しい。

【0030】そこで、本発明の発明者らは、分散補償を行うことが出来る素子複数個を、光路において直列に接続して、たとえば、15nmや30nmのように広い波長帯域に用いることが出来る光分散補償素子を構成することができる、損失が少なく接続しやすい分散補償素子の構成方法を提案した。

【0031】この接続方法を用いて、分散補償対象波長帯域幅を15nmや30nmのように広くするための1つの要素として、1つの素子としての分散補償対象波長帯域幅の広い分散補償を行うことが出来る素子の実現が望まれる。

【0032】しかしながら、通常の分散補償を行うことができる素子の帯域幅は1~3nmのものが多く、広いものでも5nm程度であった。

【0033】本発明はこのような点に鑑みてなされたものであり、本発明の目的は、従来実用化することが出来なかった広い波長域にわたって十分な分散補償、特に3次の分散補償を行うことが出来るような優れた群速度遅延時間一波長特性を有する光分散補償素子を、小型で、使いやすく、損失が少なく、信頼性が高く、量産に適した状態で、安価に提供することにあるとともに、さらに、群速度遅延の波長帯域および遅延時間の調整機能を有する多層膜素子を用いた、3次以上の分散補償を可能にする分散補償素子および分散補償方法、あるいは、2

次と3次以上の分散補償を合わせて行うことが出来る分散補償素子および分散補償方法をも提供することにある。

【0034】

【課題を解決するための手段】本発明の目的の達成を図るため、本発明の光分散補償素子は、光ファイバを通信伝送路に用いる通信に使用して波長分散を補償することが出来る光分散補償素子であって、前記光分散補償素子が、入射光に対して分散補償を行うことが出来る多層膜を有しており、前記多層膜は、少なくとも3層の光学的性質の異なる層から構成されていることを特徴としている。

【0035】そして、本発明の光分散補償素子の例は、前記多層膜が7層であり、膜の厚み方向の一方の側から順に前記7層を第1層、第2層、第3層、第4層、第5層、第6層、第7層と称するとき、反射層が第1層、第3層、第5層、第7層であり、その反射率をそれぞれ $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_5$ 、 $R_7$ とすると、 $R_1 \leq R_3 \leq R_5 \leq R_7$ であることを特徴としている。

【0036】そして、本発明の光分散補償素子の例は、入射光の中心波長を $\lambda$ として、入射光の中心波長の光に対する光路長（以下、単に、光路長ともいう）として考えたときの膜厚（以下、単に、膜厚あるいは膜の厚みともいう）が $\lambda$ の4分の1（ $\lambda/4$ ）の整数倍である積層膜を少なくとも7層有する多層膜を有し、入射光に対して、前記多層膜が少なくとも4つの光反射層（以下、単に、反射層ともいう）を有するように形成されている多層膜であることを特徴としている。

【0037】本発明の光分散補償素子の好適な一例は、前記7層の多層膜が、膜厚が $\lambda$ の1/4倍で屈折率が比較的高い層（以下、層Hともいう）と膜厚が $\lambda$ の1/4倍で屈折率が比較的低い層（以下、層Lともいう）を組み合わせた層の複数組で構成されており、前記7層の多層膜が、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層L、層Hの順に組み合わせた層（以下、LHの層ともいう）を1セット積層して構成される層（以下、層（ア）とも称す）、層Lと層Lを組み合わせた層（すなわち、層Lを2層積層して構成される層、以下、LLの層ともいう）を9セット積層して構成される層（以下、層（イ）とも称す）、層Hを1層とLHの層を2セットとを積層して構成される層（以下、層（ウ）とも称す）、LLの層を11セット積層して構成される層（以下、層（エ）とも称す）、層Hを1層とLHの層を4セットとを積層して構成される層（以下、層（オ）とも称す）、LLの層を9セット積層して構成される層（以下、層（カ）とも称す）、層Hを1層とLHの層を13セットとを積層して構成される層（以下、層（キ）とも称す）の各層で形成されていることを特徴としている。

【0038】また、前記好適な一例の代わりに、本発明の光分散補償素子の一例は、前記7層の多層膜が、多層



膜の厚み方向の一方の側から順に、前記層（ア）と同一構成の層、LLの層を3セットと層Hと層Hを組み合わせた層（すなわち、層Hを2層積層して構成される層、以下、HHの層ともいう）を3セットとLLの層を2セットとHHの層を1セットとLLの層を1セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（ク）ともいう）、前記層（ウ）と同一構成の層、LLの層を3セットとHHの層を3セットとLLの層を3セットとHHの層を1セットとLLの層を2セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（ケ）ともいう）、前記層（オ）と同一構成の層、LLの層を3セットとHHの層を3セットとLLの層を2セットとHHの層を1セットとLLの層を1セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（コ）とも称す）、前記層（キ）と同一構成の層の各層で形成されている多層膜を用いることもできることを特徴としている。

【0039】そして、本発明の光分散補償素子の例は、波長が1550nmの入射光に対して、前記反射率R1が3～50%、前記反射率R3が50～80%、前記反射率R5が80～98.5%、前記反射率R7が98.6～100%であることを特徴としており、特に好適な一例では、波長が1550nmの入射光に対して、前記反射率R1が4%近傍、前記反射率R3が65%近傍、前記反射率R5が96%近傍、前記反射率R7が100%近傍であることを特徴としている。

【0040】そして、本発明の光分散補償素子に用いられている前記多層膜の厚み方向の両端に、前記多層膜とは異なる物質（以下、基板ともいう）を設けることもでき、前記基板のうちの少なくとも一方の前記基板を、入射光を透過することができる基盤にすることができることを特徴としている。

【0041】そして、本発明の光分散補償素子の例では、前記光分散補償素子が光分散補償素子を複数組み合わせた複合型の光分散補償素子を構成する各光分散補償素子の少なくとも1つであることを特徴としており、その例として、前記光分散補償素子が、前記複合型の光分散補償素子を構成する少なくとも一組の、光の入射面（以下、光の入射面を、単に、入射面ともいう）が対向して配置された少なくとも一対の光分散補償素子（以下、前記光分散補償素子一対のそれぞれを、光分散補償素子単体ともいう）を構成する光分散補償素子の少なくとも1つとして用いられることを特徴としている。

【0042】そして、本発明の光分散補償素子の一例では、前記光分散補償素子の多層膜として、多層膜を構成する少なくとも1つの積層膜の膜厚が、前記多層膜の光の入射面に平行な断面における面内方向（以下、入射面内方向ともいう）において変化している（以下、単に膜厚が変化しているともいう）多層膜を用いる場合があり、前記光分散補償素子に係合して、前記多層膜の入射面における光の入射位置を変える手段を設ける場合があ

る。

【0043】そして、前記多層膜の膜厚が変化している少なくとも1つの層を、反射層と反射層とに挟まれた層にすることができ、また、反射層と反射層とで光透過層を挟んで前記多層膜を構成してキャビティを形成させ、膜厚が変化している積層膜の形成の仕方を工夫することにより、後述の如く、光分散補償素子の種々の特性を変えることができる。

【0044】

10 【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。なお、説明に用いる各図は本発明を理解できる程度に各構成成分の寸法、形状、配置関係などを概略的に示してある。そして本発明の説明の都合上、部分的に拡大率を変えて図示する場合もあり、本発明の説明に用いる図は、必ずしも実施例などの実物や記述と相似形でない場合もある。また、各図において、同様な構成成分については同一の番号を付けて示し、重複する説明を省略することもある。

20 【0045】図1は光ファイバを伝送路に用いる通信において生じる分散を光分散補償素子で補償する方法を説明する図で、符号1101は伝送路を伝送させた信号光の2次の分散を補償して残った信号光の3次の分散を示す群速度遅延時間－波長特性曲線、1102は3次の分散を補償することができる光分散補償素子の群速度遅延時間－波長特性曲線で、1103は、曲線1101の分散特性を有する信号光の分散を、曲線1102の分散特性を有する分散補償素子で補償したあとの補償対象波長帯域 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ の間の群速度遅延時間－波長特性曲線で、縦軸は群速度遅延時間、横軸は波長である。

30 【0046】図2～図4は、本発明に用いる各光分散補償素子（本発明では、複合型の光分散補償素子を構成する各光分散補償素子、そしてそれらのうちで入射面を対向して配置される各光分散補償素子単体を特に区別を必要としないときは、光分散補償素子単体のことも光分散補償素子と称することもあり、特に、前記入射面を対向して配置されている各光分散補償素子単体を区別して述べる必要があるときは、光分散補償素子単体と称することもある。）を構成する分散補償を行うことが出来る素子の例を説明する図で、図2は後述の多層膜の断面図、図3は膜厚を変化させた多層膜の斜視図、図4は多層膜の群速度遅延時間－波長特性曲線である。

40 【0047】図2は本発明に用いる3次の光分散補償素子の例として用いる多層膜の断面をモデル的に説明する図である。図2において、符号100は本発明に用いる光分散補償素子の例としての多層膜、101は入射光の方向を示す矢印、102は出射光の方向を示す矢印、103、104は反射率が100%未満の反射層（以下、反射膜あるいは光反射層ともいう）、105は反射率が98～100%の反射層、108、109は光透過層（以下、単に透過層ともいう）、111、112はキャ

50

ビティである。また、符号 107 は基板で、たとえば、BK-7 ガラスを使用している。

【0048】図 2 の各反射層 103、104、105 の反射率  $R(103)$ 、 $R(104)$ 、 $R(105)$  は、 $R(103) \leq R(104) \leq R(105)$  の関係にある。各反射層の反射率を、少なくとも光透過層を挟んで隣り合う反射層間において互いに異なるように設定することが量産上好ましい。すなわち、入射光が入射する側から多層膜の厚み方向に向かって、入射光の中心波長  $\lambda$  に対する各反射層の反射率が次第に大きくなるように形成する。そして、特に好ましくは、各反射層の前記波長  $\lambda$  の光に対する反射率を、 $60\% \leq R(103) \leq 77\%$ 、 $96\% \leq R(104) \leq 99.8\%$ 、 $98\% \leq R(105)$  の範囲にし、前記  $R(103)$ 、 $R(104)$ 、 $R(105)$  の大小関係を満たすように構成することにより、後述の図 4、図 5 に示すような群速度遅延時間-波長特性曲線を得ることができる。そして、 $R(103) < R(104) < R(105)$  にすることがより好ましく、 $R(105)$  を 100% に近づけるか 100% にすることがより好ましく、本発明に用いる光分散補償素子の性能を一層高めることができる。

【0049】そして、本発明に用いる光分散補償素子をより製造し易くするために、隣り合う各反射層間の光路長として考えたときの間隔がそれぞれ異なるように各反射層の形成条件を選ぶことが好ましく、各反射層の反射率の設計条件をゆるめることができ、膜厚が波長  $\lambda$  の 4 分の 1 の単位膜の組み合わせ（すなわち、 $\lambda/4$  の整数倍の膜厚の膜）で本発明に用いる 3 次の光分散補償素子に用いる多層膜を形成することができ、信頼性が高く、量産性の優れた 3 次の光分散補償素子を安価に提供することができる。

【0050】なお、前記多層膜の単位膜の膜厚が波長  $\lambda$  の 4 分の 1 であると記載したが、これは、前記の如く、量産における膜の形成で許容される誤差の範囲内において  $\lambda/4$  という意味であり、具体的には、 $\lambda/4 \pm 10\%$ （ただし、すべての膜の膜厚が同時に  $\pm 10\%$  内の誤差の大きな方向に変動しても良いという意味ではなく、いくつかの膜の膜厚が  $\pm 10\%$  内で誤差が大きな方向に変動しても他の多くの膜は  $\pm 3\%$  以内の変動であるとか、互いに特性に及ぼす悪い影響を相殺するとか、などを含み、本発明の主旨を損なわない範囲での意味であり、また、仕様によっては、後述の如くさらに狭い誤差範囲を意味する場合もある。）において本発明でいう  $\lambda/4$  の膜厚を意味しており、 $\lambda/4 \pm 1\%$  の膜厚を  $\lambda/4$  の膜厚として実施したときに、この範囲において本発明は特に大きな効果を発する。特に、上記単位膜の厚みを  $\lambda/4 \pm 0.5\%$ （この場合の  $\lambda/4$  は誤差無しの  $\lambda/4$  の意味）にすることにより、量産性を損なわずに、バラツキが少なく、信頼性の高い多層膜を形成することができ、図 5 および図 7 から図 9 を用いて後述するような光

分散補償素子を安価に提供することができる。

【0051】また、本発明における多層膜が、膜厚が  $\lambda/4$  の単位膜を積層して形成すると説明している部分があるが、これは、1 つの単位膜を形成してから次の単位膜を形成するという方法を繰り返して多層膜を形成することもできるが、これに限らず、一般的には  $\lambda/4$  の整数倍の膜厚の膜を、時間的に連続して形成することが多く、このような多層膜も当然のことながら本発明の、たとえば、膜厚が  $\lambda/4$  の整数倍である積層膜から成る多層膜に含まれるものである。そして、前記反射層と前記透過層を連続的に形成する膜形成工程を用いて本発明の多層膜のいくつかを形成することができる。

【0052】図 3 は、図 2 の多層膜 100 の入射面内方向において、前記多層膜 100 の膜厚を変化させた例を説明する図である。

【0053】図 3 において、符号 200 は本発明に用いる光分散補償素子の一例としての多層膜、201 は第 1 の反射層、202 は第 2 の反射層、203 は第 3 の反射層、205 は基板、206 は第 1 の光透過層、207 は第 2 の光透過層、211 は第 1 のキャビティ、212 は第 2 のキャビティ、220 は光入射面、230 は入射光の方向を示す矢印、240 は出射光の方向を示す矢印、250 は第 1 の膜厚変化方向を示す矢印、260 は第 2 の膜厚変化方向を示す矢印、270、271 は入射光の入射位置を移動させる方向を示す矢印である。

【0054】図 3 において、たとえば、BK-7 ガラス（ドイツ、ショット社の商品名）などから成る基板 205 の上に、第 3 の反射層 203、第 2 の光透過層 207、第 2 の反射層 202、第 1 の光透過層 206、第 1 の反射層 201 が、順次形成されている。

【0055】第 1 の光透過層 206 の入射面内方向における厚み（膜厚、以下同様）が図 3 の矢印 250 で示す方向に変化するように、そして、第 2 の光透過層 207 の入射面内方向における厚みが矢印 260 で示す方向に変化するように、前記多層膜を形成する。第 1 から第 3 の反射層の厚みと構成は、第 1 および第 2 のキャビティの共振波長が一致したときの波長が入射光の中心波長  $\lambda$  に一致したときに、第 1、第 2、第 3 の各反射層の反射率をそれぞれ  $R(201)$ 、 $R(202)$ 、 $R(203)$  とするとき、が、前記  $R(103)$ 、 $R(104)$ 、 $R(105)$  の大小関係と同様の条件、すなわち、 $R(201) \leq R(202) \leq R(203)$  等、を満たすような膜厚構成になるように形成する。

【0056】なお、前記多層膜を、入射光を透過できる適切な基板の上に、図 3 の第 1 の反射層 201 を形成し、その上に第 1 の透過層 206、第 2 の反射層 202、第 2 の透過層 207、第 3 の反射層 203 の順になるように形成し、各反射層の反射率は  $R(201) \leq R(202) \leq R(203)$  になるように構成しても本発明の効果を発揮できる。この場合、前記多層膜への入射

10

20

30

40

50

光は、前記基板側から入射される。

【0057】図4は、本発明に用いる光分散補償素子の例としての多層膜200の入射面220において、図3の矢印230の方向から入射光を入射し、矢印240の方向に出射光を得るようにし、入射光の入射位置を後述のように図3の矢印270あるいは271の方向に移動した時の、群速度遅延時間-波長特性曲線の変化する様子を説明するものである。

【0058】図4は、図3の入射位置280~282に中心波長 $\lambda_0$ の入射光を入射させたときの群速度遅延時間-波長特性曲線を示し、縦軸は群速度遅延時間、横軸は波長である。

【0059】図3の反射層201~203および光透過層206と207の各矢印250と260で示す方向に膜厚を変化させる条件を適切に選ぶことによって、前記入射光の入射面220における入射位置を矢印270で示す方向に移動させたとき、群速度遅延時間-波長特性曲線の形状をほぼ同様の形に維持しつつ、群速度遅延時間-波長特性曲線の帯域中心波長 $\lambda_0$ （たとえば、図4のほぼ左右対称の形状の群速度遅延時間-波長特性曲線2801における極値を与える波長）が変化し、そして、その各位置から矢印271で示す方向に前記入射位置を移動させたとき、前記波長 $\lambda_0$ はほぼ同じ範囲の値で、群速度遅延時間-波長特性曲線の形状を、図4の曲線2811、2812のように変化させることができる。図4の各曲線は、図3の矢印250と260の方向へそれぞれ各当該膜の膜厚を単調に増大するように形成した時のものである。

【0060】曲線2801、2811、2812における帯域中心波長 $\lambda_0$ は、分散補償の目的によって、たとえば図4のグラフの適切な波長のところに設定するが、たとえば、図4に図示の曲線の波長の範囲のほぼ中央値にとってもよく、分散補償の目的に応じて適宜定めても良い。また、曲線2801から2812、曲線2801から2811、曲線2811から2812の間のそれぞれの極値波長など曲線の各特徴点の波長や曲線の形などの対応関係をあらかじめ調べておくことなどはここに記載しなくても当然のことである。

【0061】このようにして、たとえば、まず、分散補償すべき入射光の中心波長 $\lambda_0$ に該当する帯域中心波長 $\lambda_0$ を一致させるように、入射光の入射位置を矢印270の方向に移動して決め、次に分散補償すべき補償の内容、すなわち、入射光の分散状況に適合して、分散補償に用いる群速度遅延時間-波長特性曲線の形状を、たとえば図4の各曲線などから選択し、それに応じて、図3の矢印271で示す方向に前記入射位置をたとえば符号280~282で示す各点などのように選択することにより、信号光に求められる分散補償を効果的に行うことができる。

【0062】図4の群速度遅延時間-波長特性曲線の形

状からも明らかのように、本発明に用いる光分散補償素子をそのまま用いても、たとえば、曲線2801を用いて3次分散補償を行うことができ、曲線2811または2812の比較的直線成分に近い部分を用いて、2次の微妙な分散補償を行うことができる。

【0063】以上、図2~図4を用いて説明したのは本発明に用いる「分散補償を行うことが出来る素子」であるが、この「分散補償を行うことが出来る素子」を用いれば、3次の分散をある程度補償することが出来ることは、図1と図4の各曲線の説明から明白である。また、上記説明から明らかに理解できるように、前記「分散補償を行うことが出来る素子」自体も、本発明の複合型の光分散補償素子を構成する光分散補償素子となり得るものである。

【0064】しかし、「分散補償を行うことが出来る素子」単独で補償できる分散補償の波長帯域幅は、波長が1.55 $\mu\text{m}$ 近傍の信号光について、たとえば、1.5nm前後、大きくても5nmの場合、群速度遅延時間の極値の大きさは3~6ps（ピコ秒）位の場合が多く、多層膜の構成条件を変えて、帯域幅約0.5~3nm、群速度遅延時間のピーク値が2~10ps程度の群速度遅延時間-波長特性曲線は実現することが出来る。しかし、従来知られていなかった本発明の光分散補償素子として後述するものも含めて、多数チャンネルの光通信に対応するために分散補償の波長帯域幅を10nm、30nmのように広くすると前記群速度遅延時間のピーク値は極めて小さな値となり、分散補償を十分に行うことが出来る程度の群速度遅延時間を得ることが難しく、現実の通信に使い勝手よく広く用いるには、さらなる改善がなされることが望ましい。そこで、本発明を図5~図12を用いてさらに詳しく説明する。

【0065】図5は、たとえば、前記のごとき分散補償を行うことが出来る素子を複数個用いて群速度遅延時間-波長特性を改善する方法を説明する図であり、図5

(A)は本発明に用いる分散補償を行うことが出来る素子が1個の場合の群速度遅延時間-波長特性を、図5

(B)は群速度遅延時間-波長特性曲線の形がほぼ同じで、群速度遅延時間-波長特性曲線のピーク値（以下、極値ともいう）を与える波長（以下、極値波長ともいう）が異なる分散補償を行うことが出来る素子を入射光の光路に沿って2個直列に接続した（以下、入射光の光路に沿って2個直列に接続したことを、単に、2個直列に接続したともいう。以下、3個直列、4個直列などの場合も同様。）本発明に用いる光分散補償素子の群速度遅延時間-波長特性を、図5(C)は群速度遅延時間-波長特性曲線の形がほぼ同じで極値波長が異なる分散補償を行うことが出来る素子を3個直列に接続した本発明に用いる光分散補償素子の群速度遅延時間-波長特性を、図5(D)は直列に接続する分散補償を行うことが出来る素子3個のうちの1個が他の2個と群速度遅延時

間一波長特性曲線の形も極値波長も異なる分散補償を行うことが出来る図示のような特性の素子を 3 個直列に接続した本発明に用いる光分散補償素子単体の群速度遅延時間一波長特性を、それぞれ表すグラフであり、いずれも縦軸が群速度遅延時間、横軸が波長である。そして、本発明の光分散補償方法の基本は、たとえば図 5 (A) から (D) に示したような特性を有する光分散補償素子を用いて、たとえば、図 7、図 8 を用いて後述するような複合型の光分散補償素子を構成して、それを光伝送路の中の適切なところ、たとえば、光ファイバに直列に接続させたり、伝送路に設けた増幅器、受信機、波長分波機、中継局の各種装置等の信号光の経路中に配置して前記光分散補償素子に信号光を入射させて信号光の分散を補償する分散補償方法にある。

【0066】図 5 において、符号 301～309 は本発明に用いる分散補償を行うことが出来る素子 1 個の各群速度遅延時間一波長特性曲線、310 は前記本発明に用いる群速度遅延時間一波長特性曲線の形がほぼ同じで極値波長が異なる分散補償を行うことが出来る素子を 2 個直列に接続した場合の群速度遅延時間一波長特性曲線、311 は前記本発明に用いる群速度遅延時間一波長特性曲線の形がほぼ同じで極値波長が異なる分散補償を行うことが出来る素子を 3 個直列に接続した場合の群速度遅延時間一波長特性曲線、312 は直列に接続する分散補償を行うことが出来る素子 3 個のうちの 1 個が他の 2 個と群速度遅延時間一波長特性曲線の形も極値波長も異なる分散補償を行うことが出来る図示のような特性の素子を 3 個直列に接続した場合の群速度遅延時間一波長特性曲線である。図 5 (A) で符号 a は分散補償対象波長帯域の帯域幅、b は群速度遅延時間の極値の大きさ（以下、単に、極値ともいう）である。曲線 302～307 および 309 の分散補償対象波長域の帯域幅と群速度遅延時間の極値はほぼ同じで、曲線 308 は曲線 307 や 309 よりも分散補償対象波長域の帯域幅が狭く群速度遅延時間の極値が大きい群速度遅延時間一波長特性曲線である。なお、上記曲線 301～309 の極値波長は、図示の如く、それぞれ異なっている。

【0067】図 5 (B) と (C) において、群速度遅延時間一波長特性曲線 310 の群速度遅延時間の極値は、分散補償を行うことが出来る素子 1 個の場合の 1.6 倍、分散補償対象波長帯域の帯域幅は約 1.8 倍になっており、群速度遅延時間一波長特性曲線 311 の群速度遅延時間の極値は分散補償を行うことが出来る素子 1 個の場合の約 2.3 倍、分散補償対象波長の帯域幅は分散補償を行うことが出来る素子 1 個の場合の約 2.5 倍になっている。図 5 (D) においては、群速度遅延時間一波長特性曲線 312 の曲線の群速度遅延時間の極値が分散補償を行うことが出来る素子 307 と 309 の各 1 個の場合の約 3 倍、分散補償対象波長帯域の帯域幅は分散補償を行うことが出来る素子 307 と 309 の各 1 個の

場合の約 2.3 倍になっている。

【0068】図 2～図 4 において説明したような多層膜を用いた分散補償を行うことが出来る素子の群速度遅延時間一波長特性曲線の群速度遅延時間の極値と分散補償対象波長帯域の帯域幅は、前記多層膜の各反射層と各光透過層の構成条件によって変化し、たとえば、図 5

(D) の曲線 307 のような分散補償対象波長帯域の帯域幅は比較的広いが群速度遅延時間の極値があまり大きくない群速度遅延時間一波長特性曲線と曲線 308 のように分散補償対象波長帯域の帯域幅は狭いが群速度遅延時間の極値は大きい群速度遅延時間一波長特性曲線を組み合わせるなどにより、種々の特性を有する分散補償を行うことが出来る素子を実現することが出来る。

【0069】このような分散補償を行うことが出来る素子に用いる多層膜としては、たとえば、前記「課題を解決するための手段」の項に記載したような多層膜があげられる。

【0070】上記のような多層膜は、入射面から膜の厚み方向に、反射層に挟まれた光透過層（キャビティ、すなわち入射光に対する共振器を形成している。）が 2 つ、すなわち 2 キャビティの多層膜であるが、本発明はこれに限定されず、1 キャビティ、3 キャビティ、4 キャビティなど種々の構成の多層膜を用いることを可能にするものである。

【0071】また、図 4 における群速度遅延時間一波長特性曲線や、図 5 (D) における群速度遅延時間一波長特性曲線など、直列に接続して用いる分散補償を行うことが出来る素子の群速度遅延時間一波長特性を適宜工夫して選択することにより、3 次の分散のみならず分散補償ファイバで補償して残った 2 次の微細な分散をも補償することが出来る。

【0072】また、通信伝送路の分散補償をより効果的に行うには、光分散補償素子としての群速度遅延時間一波長特性曲線を利用目的により適したものにすることが望ましい。そのための 1 つの方法として、分散補償を行うことが出来る素子の群速度遅延時間一波長特性を調整できる手段を有する方法がある。

【0073】その 1 つの方法として、図 2 と図 3 を用いて説明したような、多層膜の光透過層と反射層の膜厚を入射面内方向において変化させ、分散補償を行うことが出来る素子における入射光の入射位置を変えて、分散補償を行うことが出来る素子の群速度遅延時間一波長特性を変えることがあげられる。この入射光の入射位置を変更する手段としては、たとえば、入射光の位置に対して、多層膜 200 あるいは入射光の入射位置そのものの少なくとも一方を移動させる手段がある。前記多層膜または入射光の位置を移動させる手段としては、光分散補償素子の使用される事情、コストあるいは特性などの条件など、事情によって種々選択することができる。たとえば、コスト上あるいは装置の事情から、ネジなどの手

動的手段により行う方法を用いることができ、また、正確に調整するため、あるいは手で調整することができない時にも調整することができるようにするためには、たとえば電磁的なステップモータや連続駆動モータを用いることが効果的であり、また、PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）などを用いた圧電モーターを使用することも効果的である。また、これらの方法と組み合わせることでもできるプリズムや二芯コリメータなどを用いたり、光導波路を利用するなどの光学的手段によって入射位置を選択することにより、容易に、正確に入射位置を選択することができる。

【0074】また、前記多層膜の少なくとも1つのキャビティをたとえばエア（空気）ギャップキャビティにして、エアギャップを可変にすることにより、群速度遅延時間-波長特性を変えることができる。

【0075】本発明の光分散補償素子に用いることができる前記分散補償を行うことが出来る素子を構成する多層膜の各層は、厚みが4分の1波長の $\text{SiO}_2$ のイオンアシスト蒸着で作成した膜（以下、イオンアシスト膜ともいう）で形成された層Lと、厚みが4分の1波長の $\text{Ta}_2\text{O}_5$ のイオンアシスト膜で形成された層Hとから構成されている。前記 $\text{SiO}_2$ のイオンアシスト膜（層L）1層と $\text{Ta}_2\text{O}_5$ のイオンアシスト膜（層H）1層の組み合わせ層でLHの層1セットと称し、たとえば、「LHの層5セット積層して」とは、「層L・層H・層L・層H・層L・層H・層L・層H・層L・層Hの順に各層をそれぞれ1層ずつ重ねて形成して」ということを意味する。

【0076】同様に、前記LLの層は、厚みが4分の1波長の $\text{SiO}_2$ のイオンアシスト膜で構成されている層Lを2層重ねて形成した層をLLの層1セットと称す。したがって、たとえば、「LLの層を3セット積層して」とは、「層Lを6層重ねて形成して」を意味する。前記HHの層に関しても同様である。

【0077】なお、層Hを形成する膜の組成として、誘電体の例を示したが、本発明はこれに限定されるものではなく、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ と同様の誘電体材料としては $\text{Ta}_2\text{O}_5$ の他に、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ などを用いることができ、さらに、誘電体材料の他に、SiやGeを用いて層Hを形成することもできる。また、層Lの組成として $\text{SiO}_2$ の例を示したが、 $\text{SiO}_2$ は安価にしかも信頼性高く層Lを形成できる利点があるが、本発明はこれに限定されるものではなく、層Hの屈折率よりも屈折率が低くなる材質によって層Lを形成すれば、本発明の上記効果を発揮する光分散補償を行うことができる素子を実現することができる。

【0078】また、層L、層Hをそれぞれ1種類の材質により形成する例を説明したが、必ずしもこれに限定されず、複数種類の材料で形成したり、少なくとも1つの層を他の同様の作用の層とは異なる材料（たとえば、屈

折率の少し異なる材料）で形成することもできる。さらに、層Lと層Hのほかに、適当な第3の層を設けることがあってもよい。

【0079】また、本実施例では、前記多層膜を構成する層Lと層Hをイオンアシスト蒸着で形成したが、本発明はこれに限定されるものではなく、通常の蒸着、スパッタリング、イオンプレーティングその他の方法で形成した多層膜を用いても本発明は大きな効果を発揮するものである。

10 【0080】本発明に用いる光分散補償素子は、図3に示す光分散補償素子としての多層膜200のように、ウェハー状のものを適当に保持して用いることもでき、また、入射面220内での必要な部分を含むように、厚み方向に、すなわち、入射面220から基板205方向に、たとえば垂直にあるいは斜めに、小さく切断したチップ状にして、たとえばファイバコリメータとともに筒状のケースに実装して光分散補償素子として用いることもできるなど、その形態は多様な可能性を有するものである。

20 【0081】図6は図5で説明した例のような群速度遅延時間-波長特性曲線を実現するために本発明の発明者らが提案した分散補償を行うことが出来る素子を複数個直列に接続する方法を説明する図で、図6（A）は、前記分散補償を行うことが出来る素子2個を信号光の光路に沿って直列に接続して光分散補償素子を構成した例を、図6（B）は前記分散補償を行うことが出来る素子3個を直列に接続して光分散補償素子を構成した例を、図6（C）は入射面内方向で膜厚が変化している多層膜上で、入射光の入射位置2箇所を、信号光の光路に沿って直列に接続して光分散補償素子を構成した例を、図6（D）は図6（A）と同じ構成の光分散補償素子を1つのケースに実装した例を示す図である。

30 【0082】図6において、符号410、420、430、440は上記の如く分散補償を行うことが出来る素子を複数個直列に接続して構成した光分散補償素子、411、412、421～423、431、442、443は分散補償を行うことが出来る素子、416は分散補償を行うことが出来る素子に用いている多層膜、415、4151～4154、426、4261、4262、436、4361、4362、446、4461、4462は光ファイバ、413、4131、414、4141、424、425、434、435、444、445は信号光の進行方向を示す矢印、417はレンズ、418はレンズ417と光ファイバ4151および4152とで構成している2芯コリメータ、441はケース、431は入射面内方向で膜厚が変化している多層膜を基板上に形成して分散補償を行うことができるように構成したウェハー状の分散補償を行うことが出来る素子で、432、433はそれぞれ「分散補償を行うことが出来る素子の部分」である。また、前記各光ファイバの

うち、符号 415、4152、426、436、446 は内部接続部品としての光ファイバ、符号 4151、4153、4154、4261、4262、4361、4362、4461、4462 は外部接続部品としての光ファイバである。

【0083】図 6 (A) において、矢印 413 の方向に光ファイバ 4153 から、分散補償を行うことが出来る素子 411 に入射した信号光は、分散補償を受けて分散補償を行うことが出来る素子 411 から出射し、光ファイバ 415 を伝送されて分散補償を行うことが出来る素子 412 に入射し、再び分散補償を受けて分散補償を行うことが出来る素子 412 から出射し、矢印 414 の方向に光ファイバ 4154 を伝送される。

【0084】符号 4112 は、分散補償を行うことが出来る素子 411 の破線 4111 で囲んだ部分であり、その内部構造を説明する図である。光ファイバ 4151 および 4152 とレンズ 417 は 2 芯コリメータ 418 を構成し、光ファイバ 4151 を矢印 4131 方向に進行した信号光はレンズ 417 を通り多層膜 416 に入射する。

【0085】多層膜 416 は、たとえば図 5 (A) に示したような群速度遅延時間-波長特性を有しており、光ファイバ 4151 とレンズ 417 を通って多層膜 416 に入射した信号光は、3 次の分散補償を施され、多層膜 416 から出て再びレンズ 417 を通り、光ファイバ 4152 に入射して矢印 4141 の方向に進み、分散補償を行うことが出来る素子 412 に入射する。この場合、光ファイバ 4152 と光ファイバ 415 は実質的に同じファイバであり、光ファイバ 4151 と光ファイバ 4153 も実質的に同じである。分散補償を行うことが出来る素子 412 でさらに分散補償を施された信号光は分散補償を行うことが出来る素子 412 から出射して、光ファイバ 4154 を矢印 414 で示した方向へ進行する。

【0086】このような図 6 (A) に示した光分散補償素子 410 は、図 5 (B) に示した群速度遅延時間-波長特性を有し、光分散補償素子 410 に入射した信号光は、図 5 (B) に示したような群速度遅延時間-波長特性曲線に応じた分散補償を施されて光分散補償素子 410 から出射される。

【0087】このとき、光ファイバ 4151 を矢印 4131 方向に進行してきた信号光がたとえば 2 芯コリメータ 418 を介して、多層膜 416 に入射して分散補償を施されて多層膜 416 で反射され、光ファイバ 4152 に入射し、矢印 4141 方向に出射される過程において、光ファイバ 4151 を矢印 4131 方向に進行してきた光分散補償素子 410 の入射光に対して、光ファイバ 4152 を矢印 4141 方向に進行する光分散補償素子 410 の出射光は、約 0.3 ~ 3 dB 程度のカップリング損失（カップリングロスともいう）を受ける。この損失は、従来のファイバグレーティングを用いる分散

補償の場合に比較すれば極めて大きな損失とはいえないが、15 nm、30 nm という広い波長帯域においてより少ない損失で分散補償を行いたい場合には、図 5 で説明した直列に接続する分散補償を行うことが出来る素子の数が多くなるため、このカップリングロスに積算されると大きなロスになる。たとえば、分散補償を行うことが出来る素子 10 個を上記の接続方法で直列に接続すると、たとえば、3 ~ 30 dB のカップリングロスを生じる。この損失は、15 nm や 30 nm の広い波長帯域幅の光分散補償素子を構成するときに大きな問題になる。

【0088】本発明の目的は、このような広い波長帯域にも小さな損失で分散補償を行うことができる光分散補償素子と光分散補償方法を提供することであり、それに関して、図 7 ~ 図 12 を用いて後述する。

【0089】その前に本発明の理解をさらに深めるため、分散補償についてさらに詳述する。

【0090】図 6 (B) の光分散補償素子 420 においても同様に、矢印 424 の方向から光ファイバ 4261 を介して光分散補償素子 420 に入射した信号光は、まず、分散補償を行うことが出来る素子 421 に入射して分散補償を施されてから出射し、光ファイバ 426 を介して分散補償を行うことが出来る素子 422 ~ 423 に順次入射して出射する過程において、たとえば、図 5

(C) のような群速度遅延時間-波長特性曲線に応じた分散補償を施されて光分散補償素子 420 から出射し、光ファイバ 4262 を矢印 425 で示した方向へと進行する。

【0091】図 6 (C) は図 6 (A) の分散補償を行うことが出来る素子 411 と 412 の代わりに、同一のウェハー上に形成された「分散補償を行うことが出来る素子 431 の部分 432 と 433」を光ファイバ 436 を用いて信号光の経路に沿って直列に接続した例としての光分散補償素子 430 で、分散補償の施され方は図 6

(A) について説明したのと同様である。

【0092】ただし、分散補償の施され方は、分散補償を行うことが出来る素子の群速度遅延時間-波長特性によって変わるものであることは上記説明より明らかである。

【0093】図 6 (D) は図 6 (A) と同様の分散補償を行うことが出来る素子 442 と 443 を同一のケース 441 に組み込んで光ファイバ 446 を介して信号光の通信経路に沿って直列に接続して光分散補償素子 440 を構成したものであり、図示していないが、分散補償を行うことが出来る素子 443 は、図 3 を用いて説明した多層膜の入射面内方向において膜厚が変化している多層膜を使用しており、入射位置を調整する手段を有している。その入射位置調整手段は図示していないが、ケース 441 に設けられた制御回路とそれによって制御される入射位置調整手段駆動回路を利用して入射位置を調整することが出来るようになっている。信号光は光分散補償



素子 440 へ光ファイバ 4461 を介して入射し、光ファイバ 4462 を介して光分散補償素子 440 から出射する。

【0094】本発明における分散補償素子およびそれを用いた分散補償方法における分散補償の対象とする波長帯域を広くとることが出来るようにするためには、前記の如く、たとえば、多層膜を用いた分散補償を行うことが出来る素子を複数個、光路において直列に接続して、図 5 で説明したような主旨の分散補償素子を構成すればよく、そして、そのような分散補償素子を用いて分散を補償すればよい。

【0095】しかし、図 6 を用いて説明したように、コリメータを用いて、本発明の分散補償を行うことが出来る素子を複数個接続する場合、前記のように、接続すべき前記素子の数が多くなれば、接続に起因する光学的損失が大きな問題となる。そこで、この接続に起因する光学的損失を大幅に低減させる方法として、本発明の発明者らは図 7 および図 8 に例示する接続方法を用いた分散補償素子を本発明において提案した。

【0096】図 7 は本発明の光分散補償素子を説明する図で、(A) は側面図、(B) は上方から見た図である。図 7 (B) 中の点線は、その上方にある部分により見えない部分を説明する都合上示したものである。

【0097】図 7 で、符号 701 は複合型の光分散補償素子、703 と 704 は前記複合型の光分散補償素子 701 を構成する本発明の光分散補償素子で、以下に説明するように、それぞれ本発明に用いる分散補償を行うことが出来る素子を信号光の光路に沿って複数個直列に接続したものの例、710 と 720 は基板、711 と 721 は前記基板上に形成されており入射光に対して前述のような群速度遅延時間一波長特性を有する多層膜、730 は図 7 (A) に示した後述の入射光の光路の位置を概略示す線、741 ~ 747、750、760 ~ 767 は入射光の光路、781 と 782 は光ファイバ、783 と 784 はレンズ、708 と 709 は多層膜を形成する光透過層の膜厚の変化する方向を示す矢印である。d1 と d2 は光分散補償素子 703 と 704 のそれぞれ図示の位置における間隔である。

【0098】複合型の光分散補償素子 701 は、図示のように対向して設けられた光分散補償素子 703 と 704 で構成されている。

【0099】図 7 (A) において、光ファイバ 781 を伝送された信号光は、レンズ 783 を通り、光路 741 から光分散補償素子 701 を構成する光分散補償素子 703 に入射して分散補償を行うことが出来る素子としての多層膜 711 の入射点（光路 741 と多層膜 711 の交点）で分散補償を受けて反射され、光路 742 を通り光分散補償素子 704 に至り、分散補償を行うことが出来る素子としての多層膜 721 の入射点で分散補償を受けて反射され、以下光路 743 ~ 747 を通りそれぞれ

分散補償を行うことが出来る素子としての多層膜 711 または 721 の入射点で主として交互に分散補償を受けて反射され、さらに光路 750、760 ~ 766 を通りそれぞれ多層膜 721 または 711 の入射点で分散補償を受けて反射されて、光路 767 を通って複合型の光分散補償素子 701 から出射して、レンズ 784 から光ファイバ 782 に入射し、光ファイバ 782 を伝送される。

【0100】この場合、前記一対の光分散補償素子の一部にミラーなどの分散補償素子として機能するものでないものを配置しておいてもよい。なお、本発明において、前記の主として交互に入射させるということは、たとえば前記の光分散補償素子の一部にミラーなどを配置したことにより、一部交互に入射しないが、前記配置したミラーにより交互に入射しない部分を除いて、概ね交互に入射させるような場合も含めて交互に入射させるという意味である。

【0101】以上の説明からわかるように、光分散補償素子 703 と 704 は、信号光の各入射点（この入射点は入射点であるとともに反射点でもある）における分散補償を行うことが出来る素子を入射光すなわち信号光の光路に沿って直列に接続した光分散補償素子になっている。

【0102】複合型の光分散補償素子 701 を構成している光分散補償素子 703 と 704 は、図 7 (A) のように、図の上側が間隔 d1 で図の下側が間隔 d2 で対向して配置されている。この場合は間隔 d1 は間隔 d2 よりも狭く形成されており、光路 741 を通って入射した光は、光路 750 に至って反射方向が反転し、順次光路 760 ~ 766 を経由して光路 767 から出射する。好ましい一例において、これに限られないが、入射光の入射角を多層膜 711 の法線に対して約 5 度にとり、d1 を 10 mm として、光路 741 の入射光のビーム径を約 1 mm にすることにより、光路 767 から良好な出力光を得ることができる。

【0103】光分散補償素子 703 と 704 は、それぞれ多層膜 711 と 721 が各基板 710 と 720 の上に形成されており、多層膜 711 と 721 は、図の下側から上側に向けて多層膜を構成する膜の厚みが、図 3 の場合と変化の方向は異なるが、図 3 を用いて説明したと同様に变化する（膜の厚みが場所によって異なる、すなわち、入射面内方向において、分散補償の対象とする波長が異なる）ように形成されている。

【0104】1 つの例として多層膜 711 と 721 の各光透過層の膜厚が矢印 708 と 709 の方向に厚くなるように形成されている。したがって、図 7 (A) を用いて前述した入射光が光分散補償素子 703 と 704 の各当該位置で受ける分散補償の内容は、図 3 を用いて説明したのに準じて異なっており、それぞれの位置における群速度遅延時間一波長特性曲線の形および極値とその極

値波長が異なっている。

【0105】光路 741 から複合型の光分散補償素子 701 に入射して、光分散補償素子 703 と 704 でそれぞれ分散補償を受けて光路 767 から出射する信号光は、図 5 を用いて前述したのと同様の理由により、図 9 を用いて後述するように、光分散補償素子 703 と 704 の各位置における群速度遅延時間-波長特性曲線が合成された群速度遅延時間-波長特性曲線にほぼ近い群速度遅延時間-波長特性曲線に従った分散補償を受けることになる。

【0106】この場合、信号光は、光ファイバから入射または出射する時と光分散補償素子において分散補償を受けて反射される時に光学的損失を生じ、前者では主にカップリングロス（損失）を、後者では主に反射ロスを生じる。

【0107】一般にカップリングロスよりも反射ロスの方が大幅に小さく、その性質が異なっている。すなわち、分散補償を施される点における上記の反射ロスは、その位置における群速度遅延時間-波長特性曲線の極値を与える波長の近傍においてのみ生じ（概ね 0.1 dB 以下）、それ以外の波長ではほとんど無視出来る程度である。

【0108】本発明の光分散補償素子を用いた複合型の光分散補償素子 701 に信号光が入射されて前記の如く分散補償を受けて出射されるまでに信号光の受ける損失（ロス）は、前記各入射点（反射点でもある）における反射ロスであり、それと同じ内容の分散補償を行うことが出来るだけ、図 6 で説明したように分散補償を行うことが出来る素子を光ファイバとレンズを介して信号光の光路に沿って直列に接続した場合のカップリングロスに比べて、大幅に低減される。

【0109】図 8 は、本発明の光分散補償素子を用いた複合型の光分散補償素子の他の例であり、図中、符号 702 は本発明の光分散補償素子を用いた複合型の光分散補償素子、705 は基板、706 と 707 は前記基板 705 上に形成されており入射光に対して前述のように群速度遅延時間-波長特性を有する多層膜で構成される光分散補償素子、785 は信号光の入射方向を示す矢印、786 は信号光の出射方向を示す矢印である。基板 705 は図の上方よりも下方が次第に厚くなるように形成されており、図 7 (A) において説明した間隔  $d_1$  と  $d_2$  の作用と同じ作用を呈するように形成されている。

【0110】光分散補償素子 706 と 707 を構成している多層膜は、図 7 (A) の場合と同様に多層膜を構成する膜の厚みが変化している（すなわち、膜の厚みが多層膜内における位置によって異なる）ように形成されている。

【0111】図 8 において、矢印 785 から複合型の光分散補償素子 702 に入射した信号光は、図 7 (A) の場合と同様の理由により、基板 705 内を進行し光分散

補償素子 706 または 707 に入射して分散補償を受け、光分散補償素子 706 または 707 を構成する多層膜に反射されて基板 705 内を進行して、矢印 786 の方向へ出射する。

【0112】前記の光分散補償素子 706 と 707 を構成する多層膜および多層膜 711 と 721 は、図 2~4 を用いて説明したのと同様に、入射光に対して群速度遅延時間-波長特性に対応した分散補償を施す作用を有するものである。

10 【0113】図 7 (A) の多層膜 711 と 721 は、それぞれ基板 710 と 720 の上に形成されており、少なくとも 2 層の反射層と少なくとも 1 層の光透過層を有している。各多層膜を構成する反射層の入射光の中心波長に対する反射率は、各多層膜の表面の入射光の入射面に存在する反射層もしくは各多層膜の表面に最も近い反射層よりも、その反射層の前記基板寄りに光透過層を挟んで設けられている次の反射層の方が高い反射率を有するように各反射層が形成されている。各多層膜は、反射率が 99.5% 以上の反射層を少なくとも 1 層有してお

20 り、多層膜の表面もしくは表面に最も近い反射層から、多層膜の表面から最も近い前記反射率が 99.5% 以上の反射層の間に存在する各反射層の反射率が、表面から基板の方向に順次大きい値になっているように各反射層が形成されている。この反射層とは、光透過層を挟んでその両側にある反射層をそれぞれ 1 層の反射層とし、各反射層の反射率とは、各反射層を構成する各層 H、層 L などの単位膜の反射率を指すのではなく、前記 1 層の反射層としての反射率を指している。

【0114】図 7 (A) の各多層膜における反射層と光透過層の層数は、たとえば、反射層が 2 層で光透過層が 1 層の 1 キャビティの場合、反射層が 3 層で光透過層が 2 層の 2 キャビティの場合、反射層が 4 層で光透過層が 3 層の 3 キャビティの場合、反射層が 5 層で光透過層が 4 層の 4 キャビティの場合など多くの形態が可能であり、要求される分散補償の内容に応じて多層膜を構成して用いるようにする。

【0115】図 8 の光分散補償素子 706 と 707 も、それぞれ多層膜で構成されており、少なくとも 2 層の反射層と少なくとも 1 層の光透過層を有すること、反射率が 99.5% 以上の反射層を少なくとも 1 層有することは図 7 (A) の場合と同様であるが、基板に最も近い反射層から最初の 99.5% 以上の反射率を有する反射層まで、反射率が順次大きくなっている構成になっている点が図 7 (A) の場合と異なっている。

【0116】また、図 7 において、光分散補償素子 703 と 704 の間隔  $d_1$  と  $d_2$  を、 $d_1 < d_2$  にとったが、この  $d_1$  と  $d_2$  の差を適当な値にすることにより、対向して配置されている光分散補償素子 703 と 704 に入射する入射光と反射光の位置を、図 7 (A) に示したように、対向して配置されている光分散補償素子 70



3と704の同じ側にすることが出来る。

【0117】そして、前記間隔d1とd2の差を変えることにより、前記入射光と反射光の位置を、対向して配置されている光分散補償素子703と704の異なる側にすることもできる。さらに、前記間隔d1とd2をd1=d2にすることにより、前記入射光と反射光の位置を前記対向して配置されている光分散補償素子703と704の反対側にすることも出来る。

【0118】図9は、図7(A)の複合型の光分散補償素子701の群速度遅延時間一波長特性曲線を説明するグラフである。図9で、符号801は複合型の光分散補償素子701を構成する光分散補償素子703と704の各光路の入射位置での各群速度遅延時間一波長特性曲線の集合としての群速度遅延時間一波長特性曲線群であり、図7(A)の矢印708と709で説明したように多層膜711と721の膜厚変化の方向を逆にしていることにより左右対称の曲線群になっている。符号800は群速度遅延時間一波長特性曲線群801の各曲線をすべて合成した結果の群速度遅延時間一波長特性曲線すなわち本発明による複合型の光分散補償素子701の群速度遅延時間一波長特性曲線である。

【0119】上記複合型の光分散補償素子701の群速度遅延時間一波長特性の特徴は、群速度遅延時間一波長特性曲線群801の個々の曲線よりも大きな極値と広い帯域幅を有しているのに加えて、光ファイバとレンズを用いて結合させて図6のように構成した場合に比べて、光強度の損失が前記の如く大幅に減少していることである。

【0120】図10は、本発明の光分散補償素子の群速度遅延時間一波長特性を説明するグラフであり、符号901および902は本発明の光分散補償素子の群速度遅延時間一波長特性曲線である。

【0121】符号901で示される曲線は、図2および図3で説明したL層とH層から構成された光分散補償素子（以下、光分散補償素子Aともいう）の群速度遅延時間一波長特性を示しており、前記光分散補償素子Aの多層膜は、入射光の中心波長を $\lambda$ として、入射光の中心波長の光に対する光路長（以下、単に、光路長ともいう）として考えたときの膜厚（以下、単に、膜厚あるいは膜の厚みともいう）が $\lambda$ の1/4倍で屈折率が比較的高いH層と、膜厚が $\lambda$ の1/4倍で屈折率が比較的低いL層を組み合わせた層の複数組で構成されており、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、層L、層Hの順に組み合わせた層（以下、LHの層ともいう）を1セット積層して構成される層（以下、層（ア）とも称す）、層Lと層Lを組み合わせた層（すなわち層Lを2層積層して構成される層、以下、LLの層ともいう）を9セット積層して構成される層（以下、層（イ）とも称す）、層Hを1層とLHの層を2セットとを積層して構成される層（以下、層（ウ）とも称す）、LLの層を11セット積層し

て構成される層（以下、層（エ）とも称す）、層Hを1層とLHの層を4セットとを積層して構成される層（以下、層（オ）とも称す）、LLの層を9セット積層して構成される層（以下、層（カ）とも称す）、層Hを1層とLHの層を13セットとを積層して構成される層（以下、層（キ）とも称す）の7層で形成されている。

【0122】このように構成された多層膜を有する光分散補償素子Aは、入射光に対して、曲線901で示すように1550nmを中心として1538~1562nmという、非常に帯域幅の広い範囲で400~700fs（フェムト秒）の群速度遅延を得ることができる。そして、前記光分散補償素子Aの各反射層の反射率は、層（ア）が4%、層（ウ）が65%、層（オ）が96%、層（キ）が100%であった。

【0123】符号902で示される曲線は、L層とH層から構成された光分散補償素子（以下、光分散補償素子Bともいう）の群速度遅延時間一波長特性を示しており、前記光分散補償素子Aと同様に膜厚が $\lambda$ の1/4倍で屈折率が比較的高いH層と膜厚が $\lambda$ の1/4倍で屈折率が比較的低いL層を組み合わせた層の複数組で構成されており、多層膜の厚み方向の一方の側から順に、前記層（ア）と同一構成の層、LLの層を3セットと層Hと層Hを組み合わせた層（すなわち、層Hを2層積層して構成される層、以下、HHの層ともいう）を3セットとLLの層を2セットとHHの層を1セットとLLの層を1セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（ク）ともいう）、前記層（ウ）と同一構成の層、LLの層を3セットとHHの層を3セットとLLの層を3セットとHHの層を1セットとLLの層を2セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（ケ）ともいう）、前記層（オ）と同一構成の層、LLの層を3セットとHHの層を3セットとLLの層を2セットとHHの層を1セットとLLの層を1セットとをこの順に積層して構成される層（以下、層（コ）とも称す）、前記層（キ）と同一構成の層の7層で形成されている。

【0124】このように構成された多層膜を有する光分散補償素子Bは、入射光に対して、曲線902で示すように1550nmを中心として1538~1562nmという、非常に帯域幅の広い範囲で400~700fsの群速度遅延を得ることができる。

【0125】上記の曲線901および902で説明したように、本発明によれば非常に帯域幅の広い群速度遅延時間一波長特性を持つ前記光分散補償素子Aおよび前記光分散補償素子Bを得ることができる。

【0126】本発明による光分散補償素子の例としては、たとえば図10の例を用いて説明した光分散補償素子AおよびBのように、分散補償対象波長の4分の1の膜厚を有する単位膜を積層して形成した多層膜があげられる。しかし、本発明はこれに限定されるものではなく、図1~9を用いて説明した本発明の主旨に適合する

ものは、すべて含まれるものである。

【0127】たとえば、図10の曲線901や902のように、群速度遅延時間は数百フェムト秒のように小さな値であるが、分散補償対象波長域の帯域幅が10nmから数十nmのように広い光分散補償素子を得るための1つの例として、少なくとも4層の反射層と、各反射層間に形成された各1層の光透過層との少なくとも計7層の積層膜を有する3キャビティの多層膜において、厚み方向において、順に前記7層を第1層、第2層、第3層、第4層、第5層、第6層、第7層と称するとき、反射層が第1層、第3層、第5層、第7層であり、その反射率をそれぞれR1、R3、R5、R7とすると、 $R1 \leq R3 \leq R5 \leq R7$ であり、少なくとも反射率R7が98.6%以上である多層膜をあげることが出来る。

【0128】そして、量産上の好ましい例として、順に前記7層を第1層、第2層、第3層、第4層、第5層、第6層、第7層と称するとき、反射層が第1層、第3層、第5層、第7層であり、その反射率をそれぞれR1、R3、R5、R7とすると、 $R1 \leq R3 \leq R5 \leq R7$ になるように各層を形成することにより、良好な群速度遅延時間-波長特性を得ることができる。

【0129】そして、このような分散補償対象波長の帯域幅の広い光分散補償素子をつくり、図5～図9を用いて説明した方法に準じて複合型の光分散補償素子を構成することにより、帯域幅が広く、群速度遅延時間も10P秒以上の、通信系で要求される仕様の光分散補償素子を実現することができる。

【0130】なお、以上説明してきた複合型の光分散補償素子においては、一对の入射面が対向して配置された光分散補償素子で構成される複合型の光分散補償素子を例にとって説明したが、複合型の光分散補償素子としては、入射面が対向して配置された光分散補償素子を複数組み合わせ合わせて構成したもの、さらには、入射面が対向配置された光分散補償素子に入射面が対向配置されていない光分散補償素子を組み合わせたものも本発明の前記説明に適宜当てはまるものである。

【0131】なお、本発明の光分散補償素子を用いた複合型の分散補償素子およびそれと実質的に同様の構成にした分散補償素子を用いて分散補償を行う分散補償方法によれば、15nm、30nmなどの広い波長帯域のみならず、光通信における1nmなどと狭い波長帯域を取扱う通信系に適用することも出来、たとえば、3nmあるいは5～10nmの波長帯域を取扱う通信系に適用することも出来、いずれの場合も前記の如き極めて大きな効果をもたらすものである。

【0132】このような本発明による光分散補償素子を用いた複合型の光分散補償素子を用いて、40Gbpsの通信ビットレートで60kmの伝送を行う通信システムにおいて分散を補償した結果、きわめて良好な分散補償を行うことが出来た上に、信号光が光分散補償素子を

透過することによる損失は、光分散補償素子をレンズと光ファイバで構成するコリメータのみで行った場合に比較して、きわめて低いものであった。

【0133】以上、本発明に用いる光分散補償素子を中心に本発明の複合型の光分散補償素子とその素子を用いた光分散補償方法を説明したが、本発明の光分散補償方法のもっとも注目すべき特徴は、本発明に用いる複数の光分散補償素子の少なくとも一对を、入射面を対向させて配置し、その対向配置した一对の光分散補償素子の一方に信号光を入射し、分散補償を行なって反射し、他方の光分散補償素子に入射し、そこで分散補償を行なって反射し、一方の光分散補償素子に入射して分散補償を行なって反射するという分散補償を前記一对の光分散補償素子の間で複数回繰り返すことであり、前記一对の光分散補償素子に信号光を入射してから出射するまでの間に生ずる損失を、前記カップリングロスを生じず、カップリングロスより損失が圧倒的に小さい反射ロスの上に抑え、広い波長帯域において2次や3次の低損失の分散補償をすることを可能にしたところにある。

【0134】

【発明の効果】以上、本発明を詳細に説明したが、本発明によれば、図5(B)～(D)を用いて説明した群速度遅延時間-波長特性曲線を種々用意するにあたり、入射面を対向させて配置した少なくとも一对の光分散補償素子においては、図6(A)に説明した各内部接続部品による接続を図7および図8に示した信号光の反射で実現し、該接続部における信号光の損失を極めて小さく抑え、各チャンネルの良好な分散補償を行うことが出来る上に、複数チャンネルの良好な分散補償をも行うことが出来る小型で安価な光分散補償素子と補償方法を提供することができる。

【0135】そして、本発明の光分散補償素子による分散補償は、3次以上の分散補償において特に大きな効果をもたらすことに加えて、群速度遅延時間-波長特性の適切な調整によって、2次の分散補償も行い得るものである。

【0136】そして、本発明の光分散補償素子を用いることにより、既存の光通信システムの多くを利用することを可能にする点で、社会的経済的効果が多大なものである。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による光分散補償を説明する図である。

【図2】本発明に用いる多層膜の断面図である。

【図3】本発明に用いる多層膜の斜視図である。

【図4】本発明に用いる多層膜の群速度遅延時間-波長特性曲線である。

【図5】本発明に用いる分散補償を行うことが出来る素子を複数個用いて群速度遅延時間-波長特性を改善する方法を説明する図である。

【図6】光分散補償素子の接続を説明する図である。

【図 7】本発明の光分散補償素子を用いた複合型の光分散補償素子の例を説明する図である。

【図 8】本発明の光分散補償素子を用いた複合型の光分散補償素子の例を説明する図である。

【図 9】複合型の光分散補償素子 701 の群速度遅延時間-波長特性曲線を説明するグラフである。

【図 10】本発明の光分散補償素子の群速度遅延時間-波長特性曲線を説明するグラフである。

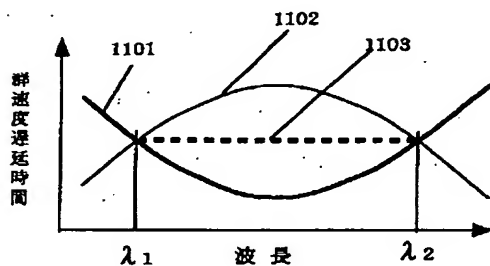
【図 11】2 次と 3 次の波長分散の補償方法を説明する図である。

【図 12】従来の光ファイバの分散-波長特性を示すグラフである。

【符号の説明】

100, 200, 416, 711, 721: 多層膜  
 101, 230: 入射光の方向を示す矢印  
 102, 240: 出射光の方向を示す矢印  
 103, 104, 105, 201, 202, 203: 反射層  
 108, 109, 206, 207: 光透過層  
 107, 205, 705, 710, 720: 基板  
 111, 112, 211, 212: キャビティ  
 220: 光入射面  
 250, 260: 膜厚変化方向を示す矢印  
 270, 271: 入射光の入射位置を移動させる方向  
 271: 曲線調整方向  
 280, 281, 282: 入射位置  
 1101, 1102, 1103, 2801, 2811, 2812, 301~312, 800, 901, 902: 群速度遅延時間-波長特性曲線  
 410, 420, 430, 440, 703, 704, 7

【図 1】



06, 707: 光分散補償素子

411, 412, 421~423, 431, 442, 443: 分散補償を行うことが出来る素子

415, 4151~4154, 426, 4261, 4262, 436, 4361, 4362, 446, 4461, 4462, 781, 782: 光ファイバ

413, 4131, 414, 4141, 424, 425, 434, 435, 444, 445: 矢印

417, 783, 784: レンズ

10 418: 2 芯コリメータ

432, 433: 分散補償を行うことが出来る素子の部分

441: ケース

501, 502, 503, 504, 511, 512, 513, 514: 信号光の特性を示すグラフ

520, 530: 伝送路

521: 分散補償ファイバ

522, 531: SMF

524, 534: 送信器

20 525, 535: 受信器

601: SMF の分散-波長特性曲線

602: 分散補償ファイバの分散-波長特性曲線

603: DSF の分散-波長特性曲線

701, 702: 複合型の光分散補償素子

730: 入射光の光路の位置を概略示す線

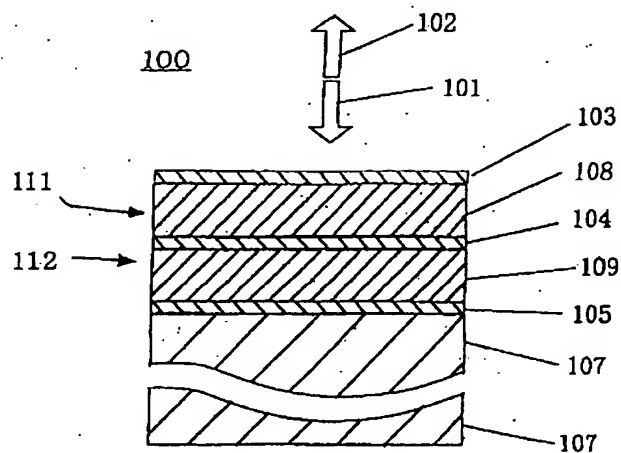
741~747, 750, 760~767: 光路

785: 入射方向を示す矢印

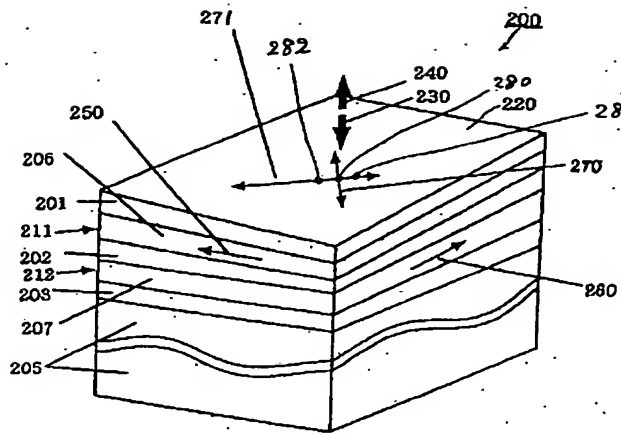
786: 出射方向を示す矢印

801: 群速度遅延時間-波長特性曲線群

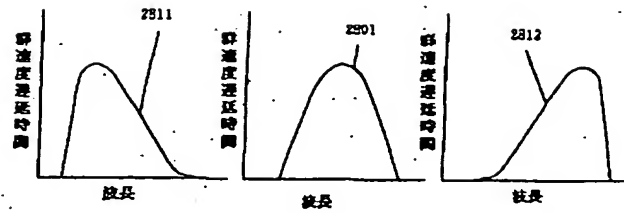
【図 2】



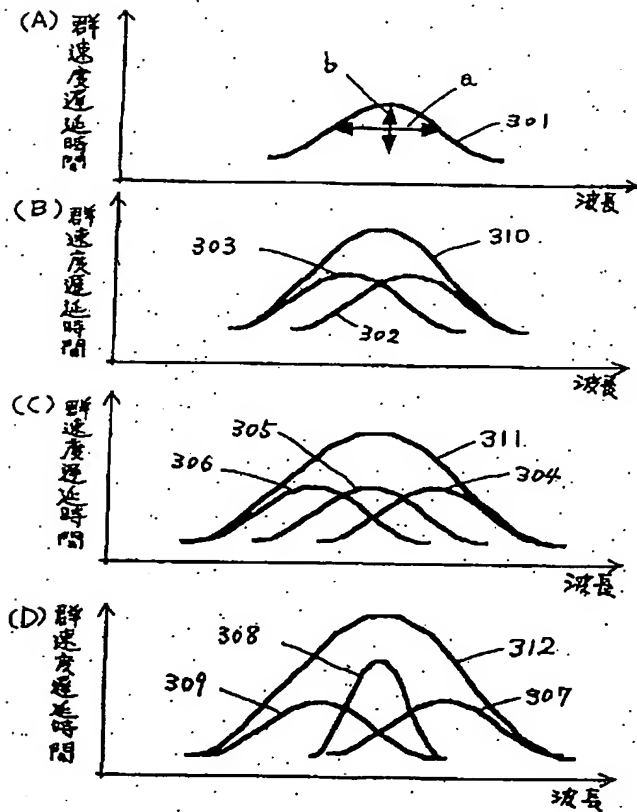
【図 3】



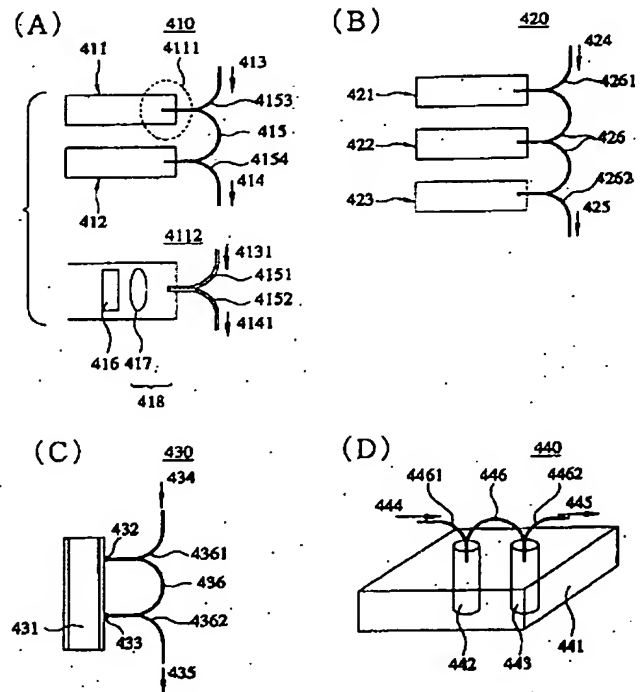
【図 4】



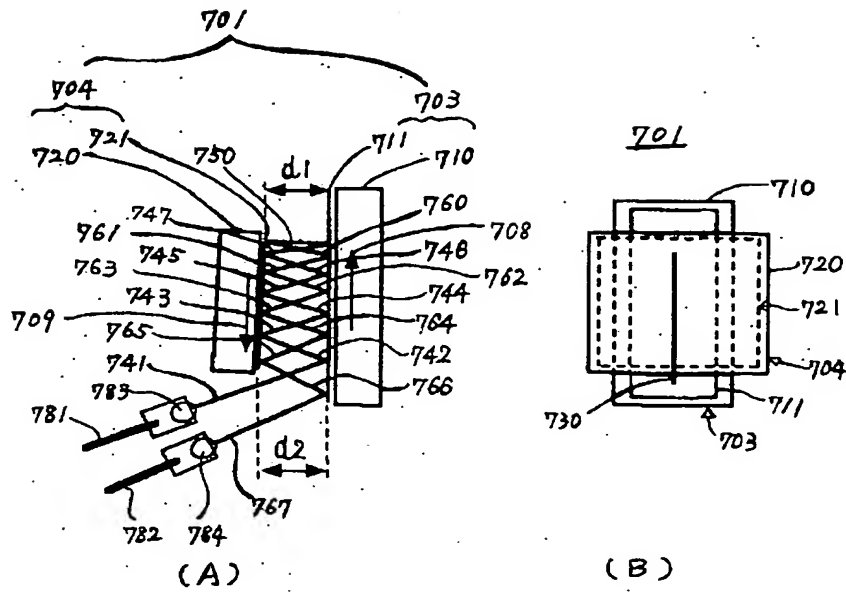
【図 5】



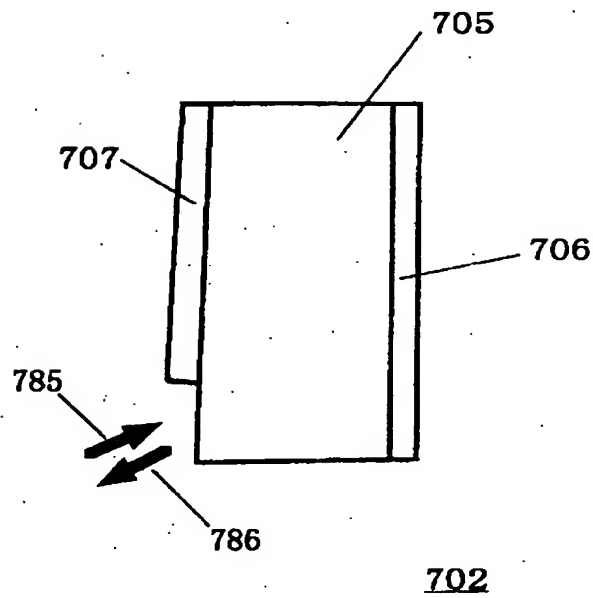
【図 6】



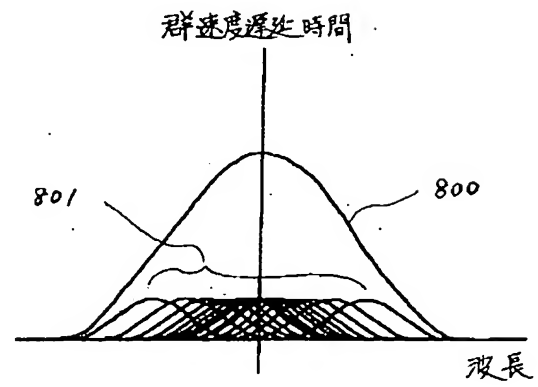
【図 7】



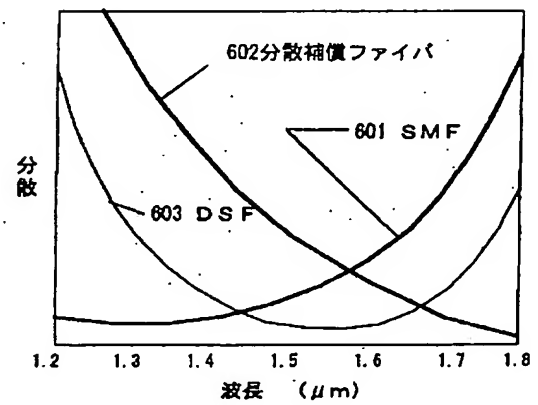
【図 8】



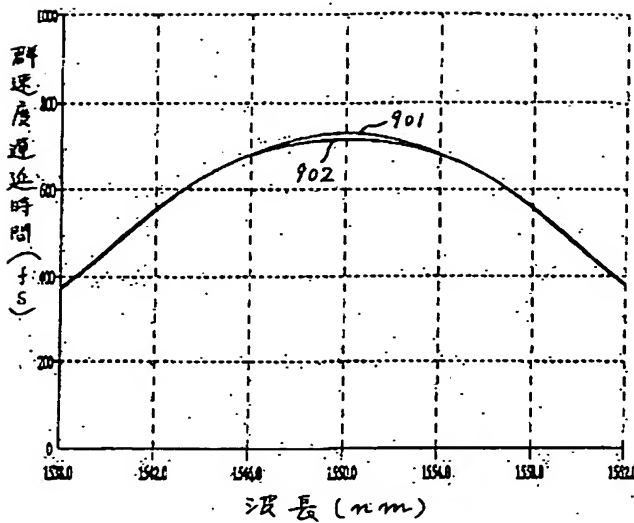
【図 9】



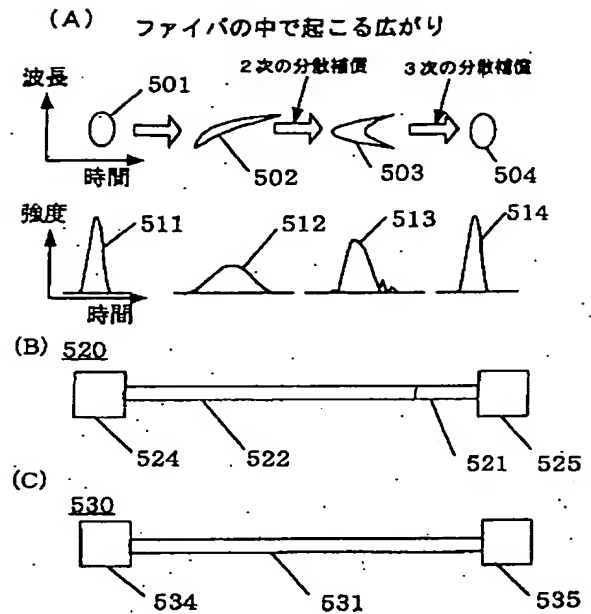
【図 12】



【図10】



【図11】



フロントページの続き

- (72)発明者 多久島 裕一  
神奈川県横浜市港北区日吉本町2-22-7  
シャルマン日吉202号室
- (72)発明者 マーク ケンネス ジャボロンスキー  
東京都目黒区駒場4丁目6番29号 K518
- (72)発明者 田中 佑一  
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式  
会社応用光電研究室内
- (72)発明者 片岡 春樹  
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式  
会社応用光電研究室内
- (72)発明者 古城 健司  
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式  
会社応用光電研究室内

- (72)発明者 東 伸  
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式  
会社応用光電研究室内
- (72)発明者 佐藤 一也  
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式  
会社応用光電研究室内
- (72)発明者 矢口 寛  
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式  
会社応用光電研究室内
- (72)発明者 山下 史郎  
埼玉県戸田市新曽南3丁目1番23号 株式  
会社応用光電研究室内
- Fターム(参考) 2H048 GA07 GA09 GA11 GA43 GA44  
GA60 GA62  
5K002 BA02 CA01 DA02 FA01